

扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器特性研究

高芮, 乌日娜, 宋云鹤, 卢佳琦, 岱钦

引用本文:

高芮, 乌日娜, 宋云鹤, 等. 扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器特性研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 379–388.

GAO Rui, WU Ri-na, SONG Yun-he, et al. Characteristics of twisted nematic liquid crystal terahertz phase modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 379–388.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0258>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

挠曲电效应对液晶微波相位调制的影响

Influence of flexoelectric effect on the microwave phase modulation of liquid crystal
液晶与显示. 2018, 33(1): 23–29 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183301.0023>

Ag 纳米线掺杂的液晶显示器件的电–光特性

Electro–optical properties of liquid crystal display doped with Ag nanowires
液晶与显示. 2015(2): 208–212 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0208>

温度对液晶波前校正器响应速度及LUT的影响研究

Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector
液晶与显示. 2018, 33(11): 911–917 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0911>

用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

Measurement of director distribution in reflective mixed–mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique
液晶与显示. 2016, 31(6): 540–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0540>

含氰基混合液晶太赫兹波吸收模拟研究

Simulation study on terahertz absorption of liquid crystal mixture with cyano radical
液晶与显示. 2017, 32(8): 590–595 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173208.0590>

文章编号:1007-2780(2021)03-0379-10

扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器特性研究

高 芮, 乌日娜, 宋云鹤, 卢佳琦, 岱 钦*

(沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 设计了扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器, 利用琼斯矩阵模拟分析了不同扭曲角 30° 、 45° 、 90° 对相位调制特性的影响。得出扭曲角越小其相位延迟量越高, 并且对光的利用率越高。进一步分析电压效应, 结果表明同一频率下加大电压可使透过率增大, 相位延迟量减小。当扭曲角为 30° , 选择液晶材料为 LC1825, 液晶盒厚度为 $250\ \mu\text{m}$ 设计了透射型相位调制器, 在 $1.2\ \text{THz}$ 频率处获得 126° 的相位延迟。为提高相位调制量设计了结构参数与透射型相同的反射型太赫兹相位调制器, 在 $1.2\ \text{THz}$ 下得到相位延迟量为 270° , 因反射型结构较透射型增加了一倍的有效光程, 相位调制量大幅提高。

关键词: 太赫兹; 相位调制; 扭曲向列相液晶; 琼斯矩阵

中图分类号: O753⁺.2; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0258

Characteristics of twisted nematic liquid crystal terahertz phase modulator

GAO Rui, WU Ri-na, SONG Yun-he, LU Jia-qi, DAI Qin*

(College of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: A terahertz phase modulator based on twisted nematic liquid crystal is designed, and the influences of twist angles of 30° , 45° , and 90° on the phase modulation characteristics are analyzed using Jones matrix simulation. The results show that a smaller twist angle leads to the higher phase retardation and larger light utilization efficiency. In addition, with the increase of the voltage at the same frequency, the transmittance increases and the phase retardation decreases. When LC1825 liquid crystal with a twist angle of 30° is injected into a liquid crystal cell with a thickness of $250\ \mu\text{m}$, the transmission-based terahertz phase modulator is built. The phase retardation of 126° is obtained at a frequency of $1.2\ \text{THz}$. In order to maximize the phase modulation, a reflection-based terahertz phase modulator is also structured, which has similar structural parameters as the transmission-based terahertz phase modulator. As a result, the phase retardation reaches 270° at $1.2\ \text{THz}$, which is much larger than the transmission-based one due to the double effective optical length.

收稿日期: 2020-09-29; **修订日期:** 2020-10-23.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61705145); 辽宁省高等学校创新人才支持计划(No.LR2016079); 辽宁省自然科学基金(No.20180550330)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61705145); Liaoning Province Higher Education Innovative Talent Support Plan (No.LR2016079); Natural Science Foundation of Liaoning Province (No.20180550330)

* 通信联系人, E-mail: daiqin2003@126.com

Key words: terahertz; phase modulation; twisted nematic liquid crystal; jones matrix

1 引言

太赫兹波(THz)是振荡频率范围为 $0.1 \sim 10$ THz 的电磁波,在电磁频谱的微波和红外区域之间架起了桥梁,在过去 20 年里引起了越来越多的关注^[1-4]。近年来,随着固体飞秒激光以及有效的光谱表征技术(如太赫兹时域光谱技术,THz-TDS)的发展,THz 技术在传感、成像、光谱、安全检查和通信方面展现出巨大的优势和应用前景^[5-7]。然而,这样成熟的 THz 技术不仅需要高效、廉价、紧凑的 THz 源和探测器,而且需要各种调制器件来引导和操纵 THz 波^[8-9]。为了满足 THz 应用系统的需求,需要研发出高性能、可调控的 THz 相位调制器。

可调谐 THz 调制器可以通过不同的工艺和材料实现^[10]。液晶是优异的可调控光电功能材料^[11],它的介电各向异性覆盖从紫外到微波的广阔频段,具有双折射效应,在外加电场或磁场的作用下,液晶分子可以重新定向,双折射随之改变,可实现动态可调控性^[12-13]。与可见光区域相比,THz 波长较长,因此需要更大的器件厚度,但液晶层厚度的增加使液晶分子排列困难,这意味着响应时间较慢,损耗更高。如果液晶的双折射率较高,则可以使用较薄的液晶层来获得相同的相移,从而降低损耗。目前有一些在可见光波段不常见的液晶材料在 THz 波段表现出较好的双折射特性^[7,14-15],如 LCMS107 ($n_e:1.80 \sim 1.85$, $n_o:1.50 \sim 1.62$)、BNHR ($n_e:1.860 \sim 1.883$, $n_o:1.581 \sim 1.602$) 和 LC1825 ($n_e:1.91 \sim 1.95$, $n_o:1.54 \sim 1.57$)。

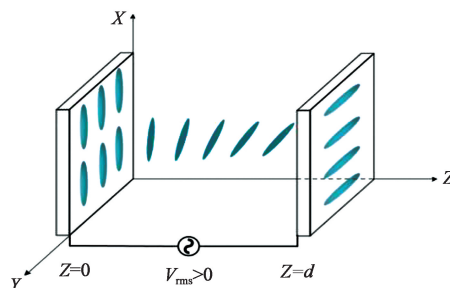
目前 THz 液晶移相器有多种调控方式,如温控、磁控、电控等,其中电控方式比较方便,降低器件成本,具有较好的应用前景。2004 年,Cho^[16]等人在实验中利用 177 V 的电压驱动厚度为 $38.6 \mu\text{m}$ 的液晶在 1.07 THz 处获得 4.07° 的相移。两年后他们进一步用厚度为 $570 \mu\text{m}$ 的 E7 液晶在 1 THz 处实现了 93.7° 的最大相移,驱动电压为 125 V^[17]。2013 年,Wu^[18]等人提出了一种以石墨烯薄膜作为透明电极的液晶 THz 移相器。在 $50 \mu\text{m}$ 厚的液晶盒中,最大相移为 10.8° ,饱和电压为 5 V。2017 年 Chodorow^[19]等人提出了基于

胆甾相液晶(ChLC)的 THz 移相器,液晶层厚度为 $454 \mu\text{m}$,在 2.5 THz 处相移约为 π 。

液晶分子扭曲取向相比于平行取向具有响应时间较快、透光性能对波长和入射角的依赖性小等优点,因此本文分别设计了透射型和反射型扭曲向列液晶相位调制器,采用传输矩阵理论数值模拟了 $0.2 \sim 1.2$ THz 范围内的相位调制特性,分析了器件不同的扭曲角对相位调制特性的影响。

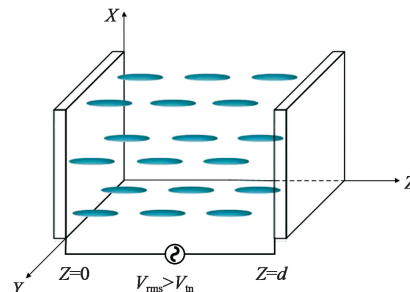
2 液晶的相位调制理论

液晶是介于固态与液态之间的一种中间状态,由于液晶分子的排列类似于晶体,有一定的规律,所以表现出很强的光学各向异性和介电各向异性。将液晶层的上下两个基板做适当的取向处理,使液晶分子在两基板处都是沿基板表面平行排列,但它们的长轴方向相差 90° ,即上下两基板表面的液晶分子指向矢相互垂直,从而形成



(a) 外加电压为零

(a) Applied voltage is zero



(b) 外加电压大于阈值电压

(b) Applied voltage is greater than the threshold voltage

图 1 扭曲排列液晶示意图

Fig.1 Schematic diagram of twisted liquid crystal

90°扭曲排列方式^[20]。将基板间的液晶层进一步分成许多薄层,每一层内分子的取向基本一致,且平行于层面,相邻层分子的取向逐渐转过一个角度,这样可以将每个薄层的液晶看作是一个单轴晶体^[21]。图1(a)是90°扭曲排列液晶示意图, z 轴方向为液晶层的方向,此时是不加电场的状态。当沿着 z 轴方向加电场时,在不考虑液晶基板表面的锚定作用下,所有的液晶分子都朝着电场方向转动产生一个倾角 θ (液晶分子长轴与 x 轴的夹角),倾角 θ 随着所加电压增大而增大,且是电压的均方根函数^[22],电压足够大时,液晶分子的长轴会沿着电场方向(z 轴)排列,如图1(b)所示。

检验偏振光沿扭曲向列相液晶器件的扭曲轴(z 轴)传播后输出光状态的最简单方法是用琼斯矩阵^[23-27]进行分析。如前文所述,把厚度为 d 的整个液晶层沿 z 轴分成均匀的 N 个薄层,液晶分子长轴在 $z=0$ 处与 x 轴对齐,每一层的液晶分

子相对于前一层转过同一角度,则每一层中液晶分子的扭曲角可用下式表示:

$$\Delta\chi = \alpha/N, \quad (1)$$

其中: α 为液晶盒的总扭曲角。考虑到各液晶层的连续性,推得第 n 层的扭曲角为:

$$\chi_n = n\Delta\chi = n\alpha/N, \quad (2)$$

设入射到第 n 层的偏振光的琼斯矩阵为 $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$,将它分解成两个主方向(快轴 f 和慢轴 s)的分量:

$$\begin{bmatrix} E_s \\ E_f \end{bmatrix} = R(\chi_n) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:

$$R(\chi_n) = \begin{bmatrix} \cos \chi_n & \sin \chi_n \\ -\sin \chi_n & \cos \chi_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

每一层液晶对光的作用相当于一个相位延迟片,光波经过第 n 层液晶的琼斯矩阵变为:

$$\begin{bmatrix} E_s' \\ E_f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-i2\pi n_e z/\lambda N) & 0 \\ 0 & \exp(-i2\pi n_o z/\lambda N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_f \end{bmatrix} = \exp(-i\varphi/N) W_0 \begin{bmatrix} E_s \\ E_f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中:

$$W_0 = \begin{bmatrix} \exp(-i\beta/N) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta/N) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

并且 $\beta = \pi d [n_e(\theta) - n_o] / \lambda$ 是液晶材料的双折射, $\varphi = \pi d [n_e(\theta) + n_o] / \lambda = \varphi_0 + \beta$, λ 为入射光的波长, $n_e(\theta)$ 为液晶的有效折射率,根据各向异性介质的折射率椭球公式:

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

将式(5)旋转回原坐标系得到:

$$\begin{bmatrix} E_x' \\ E_y' \end{bmatrix} = R(-\chi_n) \begin{bmatrix} E_s' \\ E_f' \end{bmatrix} = \exp(-i\varphi/N) \times R(-\chi_n) W_0 R(\chi_n) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}_n \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{J}_n$ 为第 n 层液晶的琼斯矩阵,液晶总的琼斯矩阵是单个矩阵的乘积。经过处理得到液晶的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{J} = \exp(-i\beta) R(-\alpha) \times \begin{bmatrix} \cos \gamma - i \left(\frac{\beta}{\gamma} \right) \sin \gamma & \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \sin \gamma \\ - \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right) \sin \gamma & \cos \gamma + i \left(\frac{\beta}{\gamma} \right) \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: $\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 。除了一个不重要的相乘相位因子 $\exp(-i\beta)$,琼斯矩阵是一个只有一个变量 β 的函数^[21]。

3 透射型相位调制器

液晶盒通常放在起偏器和检偏器之间,在图

2所示的结构中,设它们的偏振方向与 x 轴的夹角分别为 φ_1 和 φ_2 ,液晶层前表面分子取向与 x 轴平行,液晶盒扭曲角为 α 。那么经过起偏器、液晶盒、检偏器的输出光的琼斯矩阵可表示为:

$$E_{\text{out}} = \mathbf{P}_2 \times \mathbf{J} \times E_0, \quad (10)$$

其中: $\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_2 & \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 & \cos^2 \varphi_2 \end{bmatrix}$ 是检偏

器的琼斯矩阵, $\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \end{bmatrix}$ 是经过起偏器后的

入射偏振光的琼斯矩阵。根据式(10)可以得出透过率 T 和相位延迟 δ :

$$T = \left[\left(\cos \alpha \cos \gamma + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \alpha \sin \gamma \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \left(\frac{\alpha}{\gamma} \cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right]^2 + \left[-\frac{\beta}{\gamma} \cos \alpha \sin \gamma \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{\beta}{\gamma} \sin \alpha \sin \gamma \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \right]^2, \quad (11)$$

$$\delta = \beta + \arctan \left\{ \frac{\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma [\cos \alpha \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \sin \alpha \sin(\varphi_1 + \varphi_2)]}{\left(\cos \alpha \cos \gamma + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \alpha \sin \gamma \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \left(\frac{\alpha}{\gamma} \cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \right) \sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \right\}, \quad (12)$$

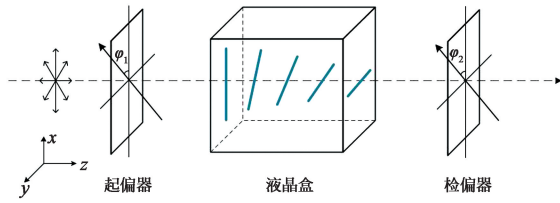


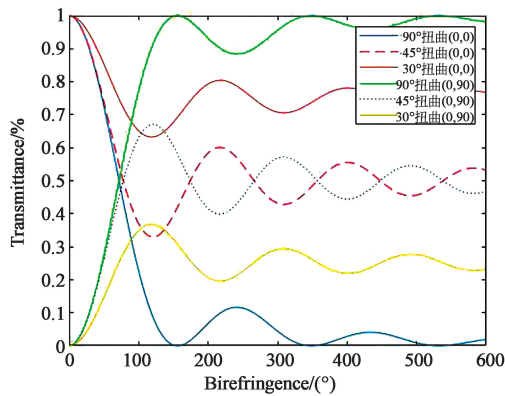
图 2 透射型相位调制器结构图

Fig.2 Structure diagram of transmissive phase modulator

根据图 2 装置模拟 THz 波段电控可调谐透射型液晶相位调制器。选用正性液晶混合物 LC1825, 其各向异性参数为: $n_e = 1.93$, $n_o = 1.56$, $\Delta n = 0.37$, $\epsilon_{\parallel} = 3.72$, $\epsilon_{\perp} = 2.43$ 。拟定液晶盒的厚度是 $250 \mu\text{m}$ 。图 3 是依据公式(11)和(12)得出的输出光透过率和相位延迟随液晶双折射 β 的变化关系曲线。需要注意的是, 根据公式(12)所得

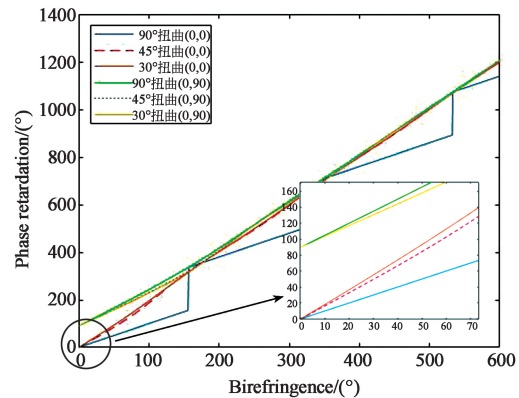
到的相位延迟是正切的反函数, 计算时会出现 π 相位的跳变, 在模拟时要注意 π 补偿的问题。另外, 90° 扭曲 $(0, 0)$ 相位延迟曲线在透过率 $T = 0$ 的地方仍存在跳变。

图中 $(0, 0)$ 和 $(0, 90)$ 表示起偏器、检偏器的偏振角 φ_1 和 φ_2 分别为 $0^\circ, 0^\circ$ 和 $0^\circ, 90^\circ$ 。根据模拟所选的器件参数和频率范围 $(0.2 \sim 1.2 \text{ THz})$ 计算得到液晶双折射 β 对应的取值为 $0^\circ \sim 66.7^\circ$, 在此范围内透过率的变化情况为: $(0, 0)$ 情况下扭曲角为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 90° 所对应的透过率变化为 $1 \sim 0.77$, $1 \sim 0.59$, $1 \sim 0.56$; $(0, 90)$ 情况下扭曲角为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 90° 所对应的透过率变化为 $0 \sim 0.44$, $0 \sim 0.41$, $0 \sim 0.23$ 。图 3(b) 可以看出 $(0, 0)$ 情况下 90° 扭曲相位延迟曲线的斜率为 1, 而 30° 和 45° 扭曲相位延迟曲线是斜率为 2 的直线, 相对来说 30° 和 45° 扭曲比 90° 扭曲能获得更大的相位调制。



(a) 透过率 T 与双折射 β 的关系

(a) Relationship between transmittance T and birefringence β



(b) 相位延迟 δ 与双折射 β 的关系

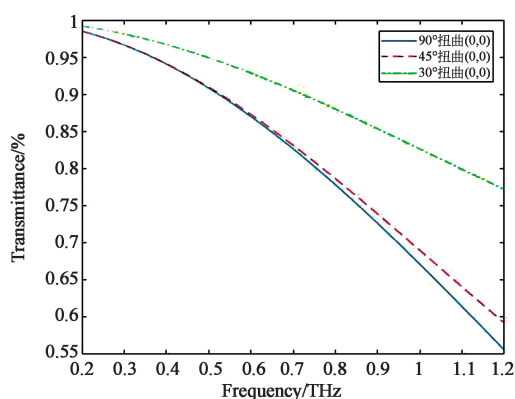
(b) Relationship between phase retardation δ and birefringence β

图 3 透过率和相位延迟随双折射的变化关系

Fig.3 Transmittance and phase retardation change with birefringence

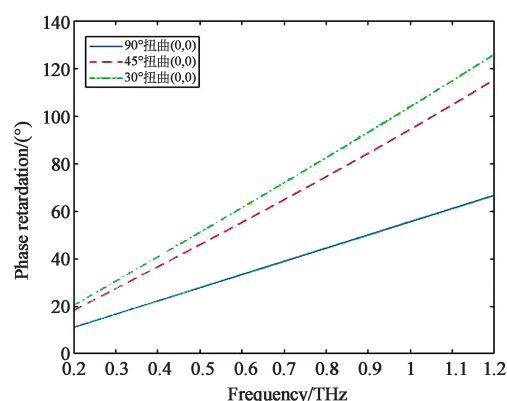
将起偏器与检偏器平行放置,且与液晶层前表面的液晶分子平行。将液晶盒上下两个基板的取向

方向设置为 30° 、 45° 、 90° ,获得不同的扭曲角,得到透过率和相位延迟随频率变化的曲线,如图4所示。



(a) 透过率曲线

(a) Transmittance curves



(b) 相位延迟曲线

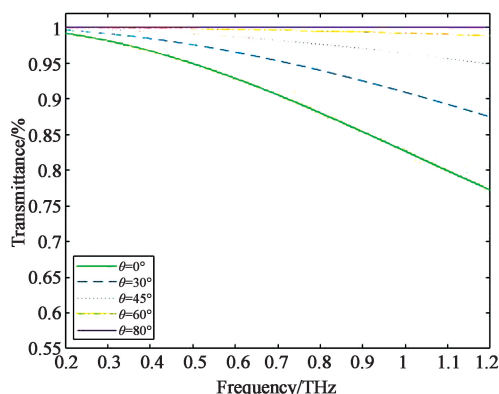
(b) Phase retardation curves

图4 不同扭曲角的调制曲线

Fig.4 Modulation curves of different twist angles

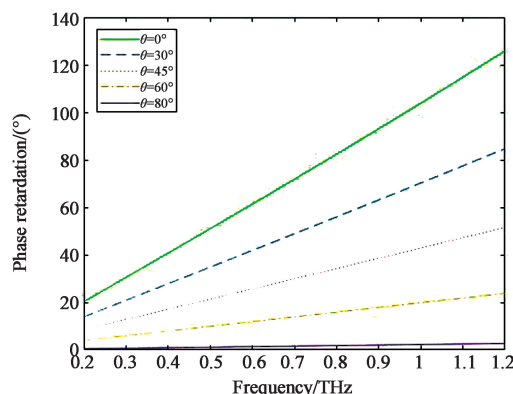
图4(a)中,随着频率增大, 30° 、 45° 和 90° 扭曲的透过率从 0.99 左右分别下降到 0.77、0.59 和 0.56。由于液晶的双折射效应和偏振片的共同作用造成透过率 T 变化,根据公式(11),当扭曲角 α 、偏振器的偏振角 φ_1 和 φ_2 确定后, T 只与 β 有关(γ 是 β 的函数),又因 $\beta = \pi d [n_e(\theta) - n_o] / \lambda$, THz 范围内随着频率增大,波长变小,使双折射 β 增大,结合图3(a)可知导致透过率下降。相同频率下 45° 和 90° 扭曲所得的透过率变化大致相同, 30° 扭曲得到的透过率高且变化范围较小。图4(b)中,随着频率增大,液晶双折射 β 变大,进而相

位延迟增大,频率为 1.2 THz 时分别可达到 126° 、 115° 和 67° ,即 30° 和 45° 扭曲的相位延迟相近,且远大于 90° 扭曲的相位延迟。由此可以看出,当相位延迟量相同的情况下, 30° 扭曲会比 45° 扭曲对光的利用率更大一些,减少了损耗。因此选择扭曲角为 30° 进一步分析电压效应。由于液晶分子的倾角 θ 是电压的函数,在图1原理图中,加电压液晶分子倾角变大,因此可以通过倾角的变化看出电压效应。将 θ 值分别取值为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 80° ,得到不同倾角下透过率曲线和相位延迟曲线如图5所示。



(a) 透过率随频率的变化关系

(a) Relationship between transmittance and frequency



(b) 相位延迟随频率的变化关系

(b) Relationship between phase retardation and frequency

图5 不同倾角的调制曲线

Fig.5 Modulation curves of different tilt angles

由图 5(a)可知,相同频率下随着倾角增大透过率逐渐增大,当倾角达到 80° 时,透过率近似为 1,这是因为倾角增大导致液晶分子不再扭曲,而是垂直于基板排列,液晶分子的旋光性消失,使得从起偏器入射的偏振光在输出时与检偏器偏振方向一致。图 5(b)为不同倾角下相位延迟的变化曲线,可以看出,频率相同时,相位延迟随倾角的增大而减小,因为倾角增大有效折射率减小,导致双折射 β 减小。1.2 THz 时,倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 80° 时的位相延迟分别为 126° 、 85° 、 52° 、 24° 和 3° ,可以实现相位延迟电压调谐。

4 反射型相位调制器

根据上文透射型器件的研究方法对反射型器件进行相应的分析。反射型相位调制器主要由起偏器、液晶层、基板反射镜、检偏器构成。入射光由起偏器和半透半反镜进入液晶层后,经过反射镜反射再次进入液晶层,最后在检偏器方向输出光。在 THz 波段金属材料相比于其他材料表现

出极高的反射率,可用来做反射镜,目前 THz 反射镜大多都是金材料。

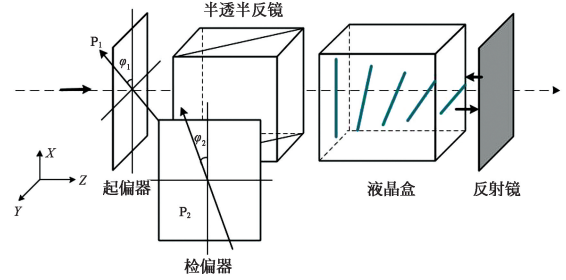


图 6 反射型相位调制器结构图

Fig.6 Structure diagram of reflective phase modulator

在图 6 所示的结构中,设起偏器和检偏器的偏振方向与 x 轴的夹角分别为 φ_1 和 φ_2 。那么输出光的琼斯矩阵^[28-29]可表示为:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = P_2 \times R(\alpha) \times J \times R(-\alpha) \times \mathbf{M}_i \times J \times E_0, \quad (13)$$

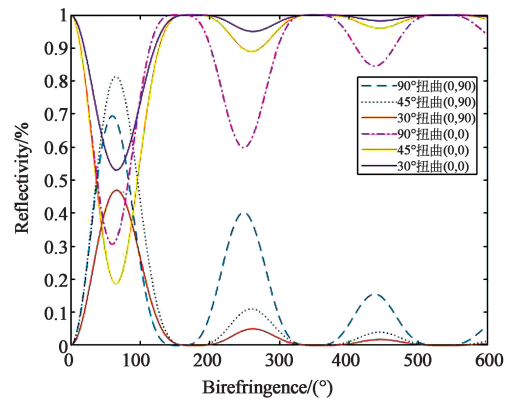
式中: $\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 为反射镜的琼斯矩阵,其他的参量与透射型相同。根据式(13)可以得到反射率 R 和相位延迟 δ :

$$R = \left\{ \left[\left(\frac{\alpha}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\gamma} \right)^2 \cos 2\gamma \right] \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 + \left\{ \frac{\alpha\beta}{\gamma^2} (1 - \cos 2\gamma) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{\beta}{\gamma} \sin 2\gamma \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right\}^2, \quad (14)$$

$$\delta = 2\beta - \arctan \left\{ \frac{\frac{\alpha\beta}{\gamma^2} (1 - \cos 2\gamma) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{\beta}{\gamma} \sin 2\gamma \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\left[\left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\gamma} \right)^2 \cos 2\gamma \right] \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \right\}, \quad (15)$$

根据图 6 装置模拟 THz 波段电控可调谐反射型液晶相位调制器,液晶盒参数与透射型相同。依据公式(14)和(15)得出输出光反射率和相位延迟随液晶双折射 β 的变化关系曲线,如图 7 所示。与透射型类似,相位延迟要注意 π 跳变的问题。

图中(0,0)和(0,90)表示起偏器、检偏器的偏振角 φ_1 和 φ_2 分别为 0° 、 0° 和 0° 、 90° 。由图 7(a)可知,在双折射 β 为 $0 \sim 66.7^\circ$ 范围内,(0,0)情况下 30° 、 45° 和 90° 扭曲的反射率变化为 $1 \sim 0.53$ 、 $1 \sim 0.19$ 和 $1 \sim 0.31$; (0,90) 情况下 30° 、 45° 和 90° 扭曲所对应的反射率变化为 $0 \sim 0.47$ 、 $0 \sim 0.81$ 、 $0 \sim 0.69$ 。图 7(b)可以看出(0,0)情况 30° 和 45° 扭曲的相位延迟量较大,更适合做相位调制器。因此偏振器摆放



(a) 反射率 R 与双折射 β 的关系

(a) Relationship between reflectivity R and birefringence β

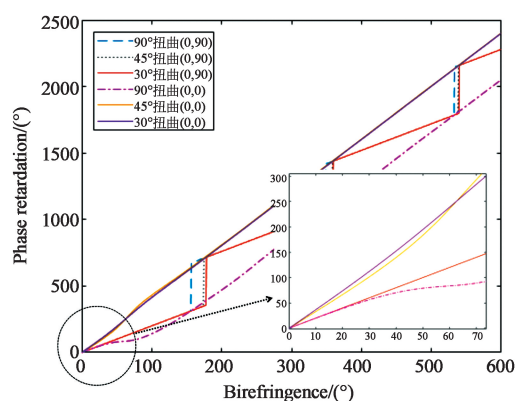
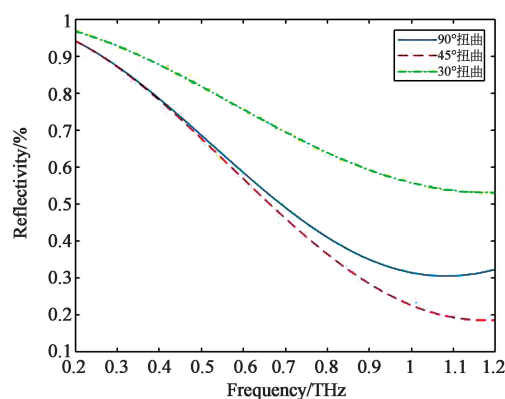
(b) 相位延迟 δ 与双折射 β 的关系(b) Relationship between phase retardation δ and birefringence β

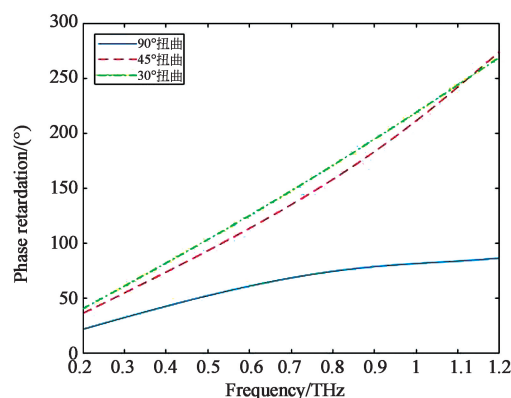
图7 反射率和相位延迟随双折射的变化关系

Fig.7 Transmittance and phase retardation change with birefringence



(a) 反射率曲线

(a) Reflectivity curves



(b) 相位延迟曲线

(b) Phase retardation curves

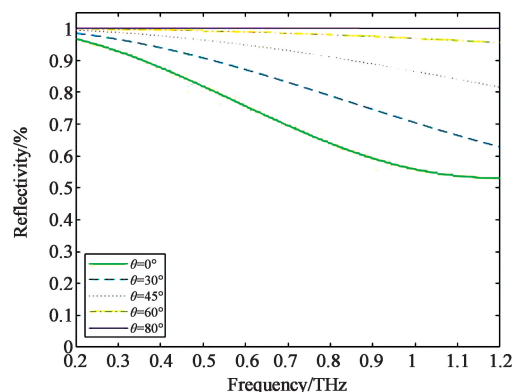
图8 不同扭曲角的调制曲线

Fig.8 Modulation curves of different twist angles

与透射型相同,模拟 THz 波段不同扭曲角的反射率和相位延迟随频率变化的曲线,如图 8 所示。

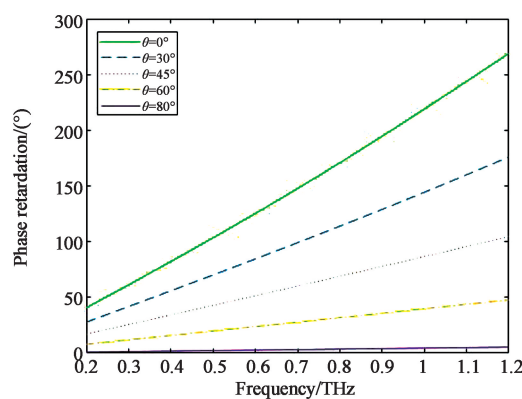
曲线的变化趋势与透射型相似,图 8(a)中 45°和 90°扭曲的反射率变化幅度剧烈,从 0.97 分别下降到 0.19 和 0.31,对光的损耗较大,30°扭曲得到的反射率高且变化范围较小,从 0.97 降到 0.53。图 8(b)中 30°和 45°扭曲的相位延迟曲线相近,最大的相位延迟量达到 270°,而 90°扭曲的最大相位延迟量为 87°。由此可以看出,在相位延迟量相同的情况下,30°扭曲是更优的选择,这与透射型器件具有相同的结论。

图 9 为 30°扭曲器件不同倾角的反射率和相位延迟变化曲线,倾角 θ 的取值与透射型器件相同。倾角为 0°时在 1.2 THz 处的反射率为 0.53,曲线的变化趋势与透射型相同,在此不做赘述。



(a) 反射率随频率的变化关系

(a) Relationship between reflectivity and frequency



(b) 相位延迟随频率的变化关系

(b) Relationship between phase retardation and frequency

图9 不同倾角的调制曲线

Fig.9 Modulation curves of different tilt angles

反射镜的作用使光在传输过程中经历了两次液晶层,相当于增加了一倍的有效光程,使相位延迟增大到 270° 。综合看来,反射型器件对光的损耗虽比透射型大,但是相位调制量大幅提高,约为透射型的 2 倍,验证了模拟结果的准确性。

5 结 论

本文利用琼斯矩阵理论分析 THz 波段偏振光在扭曲向列相液晶盒中的传播状态,探究不同扭曲角对相位调制特性的影响,综合透过率和相

位延迟量两个因素来看,扭曲角越小达到的效果越好。设计透射型和反射型 30° 扭曲液晶相位调制器并数值分析其在 $0.2\sim 1.2$ THz 波段的相位调制特性,通过液晶分子倾角和电压的关系分析了器件的电压效应,在 1.2 THz 倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 80° 时,透射型器件的位相延迟分别为 126° 、 85° 、 52° 、 24° 和 3° ,反射型器件的位相延迟分别为 270° 、 176° 、 105° 、 48° 和 6° ,即与透射型相同的厚度下,反射型获得的相位延迟约为透射型的 2 倍。这些分析结果对于 THz 波段液晶相位调制器的设计与应用具有重要的借鉴作用。

参 考 文 献:

- [1] 冀允允.太赫兹液晶相位调制器件研究[D].天津:南开大学,2018.
JI Y Y. Research on terahertz phase modulation devices based on liquid crystals[J]. Tianjin: Nankai University, 2018. (in Chinese)
- [2] 石爽.基于液晶调谐的太赫兹超材料滤波器研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
SHI S. Research on tunable terahertz metamaterial filter based on liquid crystal[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.(in Chinese)
- [3] 崔轩.基于向列相液晶的太赫兹波调制器的结构设计及其性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
CUI X. The Research on structure and performance of nematic liquid crystal terahertz modulators [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 刘岩,范飞,陈赛,等.外场下向列相液晶太赫兹光学性质[J].光学学报,2016, 36(2): 3346-3348.
LIU Y, FAN F, CHEN S, *et al.* Terahertz optical properties of nematic liquid crystals depended on different external fields [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 3346-3348.(in Chinese)
- [5] RYOUTA I, TOSHIKI N, MASANORI O, *et al.* THz wave transmission properties of lc composite membrane films[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, (1): 144-145.
- [6] CHEN Z Z, JIANG L J, MA H. Calculation on frequency and temperature properties of birefringence of nematic liquid crystal5CB in terahertz band[J]. *Chemical Physics Letters*, 2016, 14(3): 3-5.
- [7] 冀允允,范飞,于建平,等.太赫兹液晶可调谐功能器件[J].中国激光,2019, 46(6): 1-2.
JI Y Y, FAN F, YU J P, *et al.* Terahertz tunable devices based on liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 1-2. (in Chinese)
- [8] RAFAL W, NICO V, OLAF K, *et al.* Liquid crystal based electrically switchable Bragg structure for THz waves [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7378-7379.
- [9] ANUP K S, CHANS Y, OSAMU W, *et al.* Twisted nematic liquid crystal based terahertz phase shifter with crossed indium tin oxide finger type electrodes[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(4): 399-401.
- [10] YANG J, WANG P, GAO S, *et al.* Tunable terahertz transmission properties of double-layered metal hole-loop arrays using nematic liquid crystal[J]. *Springer Nature*, 2019, 2(18): 634-736.
- [11] LI X F, NICHOLAS T, MIKE P, *et al.* High-birefringence nematic liquid crystal for broadband THz applications [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 2(9): 1-2.
- [12] 李振杰,袁瑞,孙婷婷,等.挠曲电效应对液晶微波相位调制的影响[J].液晶与显示,2018, 33(1): 24-25.
LI Z J, YUAN R, SUN T T, *et al.* Influence of flexoelectric effect on phase modulation of liquid the microwave

- crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 24-25.
- [13] 李颖奎,齐冀,张洁,等. 基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(9): 765-766.
- LI Y K, QI J, ZHANG J, *et al.* Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(9): 765-766.
- [14] 王磊,肖芮文,葛士军,等. 太赫兹液晶材料与器件研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(8): 2.
- WANG L, XIAO R W, GE S J, *et al.* Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(8): 2. (in Chinese)
- [15] NICO V, MOHAMMAD K S, BENEDIKT S, *et al.* THz properties of nematic liquid crystals [J]. *Springer*, 2010, 31(9): 1313.
- [16] TSAI T R, CHEN C Y, PAN R P, *et al.* Electrically controlled room temperature terahertz phase shifter with liquid crystal [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(2): 77-79.
- [17] HSIEH C F, PAN R P. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1112-1114.
- [18] WU Y, RUAN X Z, CHEN C H, *et al.* Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21395-21402.
- [19] CHODOROW U, PARKA J, STRZEZYSZ O, *et al.* Liquid crystal phase shifter for THz radiation with cholesteric liquid crystal[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2017, 65(7): 51-55.
- [20] 陈怀新,魏宏刚,陈祯培,等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 562-563.
- CHEN H X, WEI H G, CHEN Z P, *et al.* A controllable array Fresnel zone plates using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 562-563. (in Chinese)
- [21] LU K H, BAHAA E A, SALE H. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(3): 240-241.
- [22] 刘永军,连佳,胡立发,等. 液晶器件相位调制特性研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 745-746.
- LIU Y J, LIAN J, HU L F, *et al.* The investigation of phase modulation of liquid crystal device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 745-746. (in Chinese)
- [23] 吴晓平,许远忠,胡强高. 一种基于液晶技术的可调谐滤波器研究[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(3): 33-34.
- WU X P, XU Y Z, HU Q G. Research of the tunable filter based on liquid crystal technology[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(3): 33-34. (in Chinese)
- [24] 徐金宏,拜爱萍. JONES 矩阵法推导偏振光干涉的光强公式[J]. *广西物理*, 2010, 31(3): 40-42.
- XU J H, BAI A P. Deduction of light intensity formula related to polarized light by JONES matrix method[J]. *Guangxi Physics*, 2010, 31(3): 40-42. (in Chinese)
- [25] 胡玲. 电光调制的琼斯矩阵分析[J]. *科学论坛*, 2013, 20(1): 197.
- HU L. Jones matrix analysis of electro-optic modulation[J]. *Science Forum*, 2013, 20(1): 197. (in Chinese)
- [26] 邹明. 偏振光干涉的琼斯矩阵分析[J]. *大学物理*, 2008, 27(10): 30-31.
- ZOU M. Analyses of Jones matrix of polarized light interference[J]. *College physics*, 2008, 27(10): 30-31. (in Chinese)
- [27] 刘静. 扭曲向列型液晶纯相位空间光调制器[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- LIU J. The phase only twist nematic liquid crystal spatial light modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [28] 葛爱明,隋展,徐克琦. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(10): 2481-2483.
- GE A M, SUI Z, XU K S. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(10): 2481-2483. (in Chinese)
- [29] 葛爱明,隋展,苏俊宏. 反射式液晶器件振幅调制特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 346-348.

GE A M, SUI Z, SU J H. Research on characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon device[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 346-348. (in Chinese)

作者简介:



高 芮(1997—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,2019 年于沈阳理工大学获得学士学位,主要从事液晶物理与器件方向的研究。E-mail: freegaorui @163.com



岱 钦(1977—),男,内蒙古通辽人,博士,教授,2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: daiqin2003@ 126.com